

·测试、试验与仿真·

## 适度反馈下半导体激光器自混合干涉效应与微振动测量研究

罗 勋<sup>1</sup>, 王 路<sup>1</sup>, 王 慧<sup>2</sup>, 黄文财<sup>1</sup>

(1. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005; 2. 福建省三明市计量所, 福建 三明 365000)

**摘 要:** 根据光反馈自混合干涉效应的基本理论模型, 通过求解适度反馈下的相位方程, 讨论了半导体激光器的运行模式及特性, 并搭建自混合干涉测量实验系统进行实验研究, 与模拟仿真结果进行对比分析。在此基础上, 实验研究表明扬声器的振幅与驱动电压成良好的线性关系。

**关键词:** 自混合干涉; 适度反馈; 微振动测量

中图分类号: TN29; TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-01-0081-04

## Research on Self-mixing Interference Effect and Micro-vibration Measurement of Semiconductor Laser at Moderate Feedback Condition

LUO Xun<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, HUANG Wen-cai<sup>1</sup>

(1. Department of Electronics Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Fujian Province Sanming City Metrology Institute, Sanming 365000, China)

**Abstract:** The operating states and features of semiconductor lasers are discussed based on basic theory models of laser feedback self-mixing interference effect and phase equations at moderate feedback condition. Measurement experiment systems of self-mixing interference are built for experiment research, which are compared and analyzed with the results of simulation. Based on this, the experiment research result shows that a good linear relationship between amplitude of loudspeaker and driving voltage is formed.

**Key words:** self-mixing interference; moderate feedback; micro-vibration measurement

1963年, King等人<sup>[1]</sup>在实验中发现了存在外部光反馈时, 会引起激光器的输出强度发生变化的现象, 从而奠定了自混合干涉理论的基础。半导体激光自混合干涉测量技术作为近年来兴起的新技术, 已广泛应用于位移<sup>[2]</sup>、绝对距离<sup>[3]</sup>、速度<sup>[4]</sup>、振动<sup>[5]</sup>等物理测量。

光反馈因子 $C$ <sup>[6]</sup>用来表征外部光反馈强度的高低, 是光反馈自混合干涉测量系统的一个重要参数, 它直接影响自混合干涉信号的特性。因此对光反馈因子的研究与测量具有重要的理论和实际意义<sup>[7-8]</sup>。文中根据光反馈自混合干涉效应的基本理论模型, 通过求解

适度反馈下的相位方程, 讨论了半导体激光器的运行模式及特性, 在此基础上设计了包括取样、放大和滤波的电路处理模块, 搭建自混合干涉测量实验系统, 实验获得很好的自混合干涉信号, 并与模拟仿真结果进行对比分析。同时, 测量了扬声器振幅与驱动电压的关系。

### 1 理论模型与仿真分析

自混合干涉系统可以看成复合腔激光器, 如图1所示,  $R_1$ ,  $R_2$ 分别为半导体激光器的两个腔镜,  $R_{ext}$ 为外反射物,  $PD$ 用于探测自混合信号, 图1整个结构

收稿日期: 2012-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(61108019); 福建省自然科学基金(2011J01368)

作者简介: 罗勋(1986-), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光自混合干涉测量技术; 黄文财(1976-), 男, 福建三明人, 教授, 研究方向为光纤激光器与光电传感技术。

可以看成是三镜腔结构。根据光传播理论和激光内腔激发条件,利用三镜腔F-P模型分析自混合干涉理论<sup>[9]</sup>,可以得到其数学模型

$$\begin{cases} \phi = \phi_0 - C \sin(\phi + \arctan \alpha) \\ P(\phi) = P_0 [1 + mG(\phi)] \\ G(\phi) = \cos(\phi) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\alpha$ 表示半导体激光器谱线展宽因子; $C$ 为光反馈因子; $\phi$ 和 $\phi_0$ 分别表示有光反馈和无光反馈时激光器输出光波的相位, $P$ 和 $P_0$ 分别是有外腔光反馈和无光反馈时半导体激光器的输出功率; $m$ 为幅度调制系数, $G(\phi)$ 为干涉函数,它体现了外腔光相对对输出功率的影响。

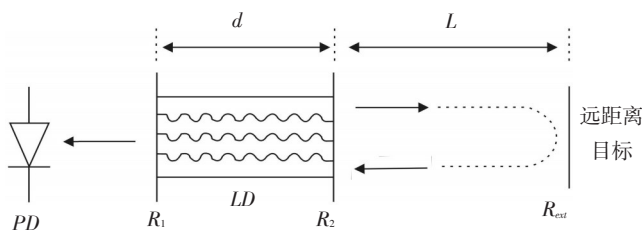


图1 三镜F-P腔模型

当 $C < 1$ 时,系统处于弱反馈状态,单稳态运行,干涉信号类似于传统的双光束干涉信号,具有非对称型。 $1 < C < 4.6$ 为适度反馈状态,干涉信号为带倾斜的锯齿波形,干涉函数 $G(\phi)$ 中的 $\phi$ 会有1个或3个解,此时系统处于双稳态,具有滞回现象。而在强反馈 $C > 4.6$ 下, $\phi$ 保持3个或5个解,使得激光器模式跳变不稳定,导致波形严重失真,无法反映物体的运动信息<sup>[9]</sup>。

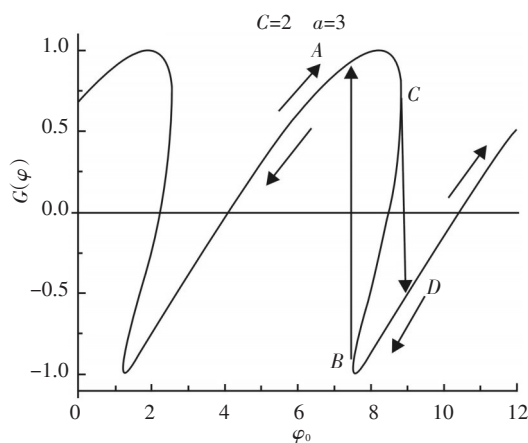


图2 适度反馈下干涉函数滞回曲线

仿真了在适度反馈( $C=2, \alpha=3$ )下的干涉函数滞回曲线,如图2所示。随着 $\phi_0$ 增加,干涉函数 $G(\phi)$ 沿

$A \rightarrow C \rightarrow D$ 变化。而 $\phi_0$ 减少时, $G(\phi)$ 是沿着 $D \rightarrow B \rightarrow A$ 的路径变化, $ABCD$ 则被称作迟滞面。而 $B \rightarrow A$ 和 $C \rightarrow D$ 之间的模式跳变,产生了带倾斜的锯齿波形的干涉信号,如图3所示。图3给出了当外腔反射物做简谐振动(振幅 $1 \mu\text{m}$ )时, $C=2$ 和 $C=1.2$ 下的自混合干涉信号,从图3的仿真结果可以看出,在反馈因子略大于1的情况下,自混合干涉信号幅度变化稳定,条纹倾斜明显,即当反射物体位移增大时,锯齿波形向右倾斜,当反射物体位移减小时,锯齿波形向左倾斜,因此更适于实际中的测量应用。

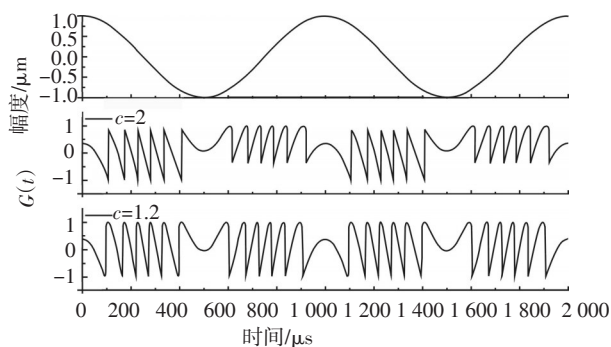


图3  $C=2$ 和 $C=1.2$ 时自混合干涉仿真信号

## 2 实验研究

实验系统如图4所示,半导体激光器选用的是发射波长为 $650 \text{ nm}$ 、功率为 $5 \text{ mW}$ 的红光LD(FU650 AD5\_C9N)。激光器的光束发散角由封装在激光器输出端的微透镜来调节。由激光器前端面发出的激光照射在附在扬声器的振动表面上,激光被振动表面散射(反射),其中一部分散射(反射)光又经原路反馈回激光器谐振腔,同谐振腔内的光合并调制激光器出射光的光频率及光功率。光功率的变化可以由封装在激光器尾部的光电探测器(PD)探测,后续的光电处理电路由跨阻取样、放大和滤波电路三部分组成,取样电阻为 $10 \text{ k}\Omega$ ,反向放大倍率为50倍,滤波选用巴特沃斯二阶低通滤波电路,截止频率为 $10 \text{ kHz}$ ,品质因数为0.707,经光电处理后获得的自混合信号由示波器(Tektronix, TDS1001B)显示。

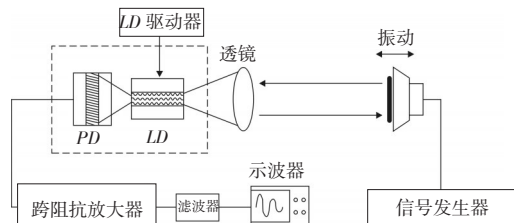
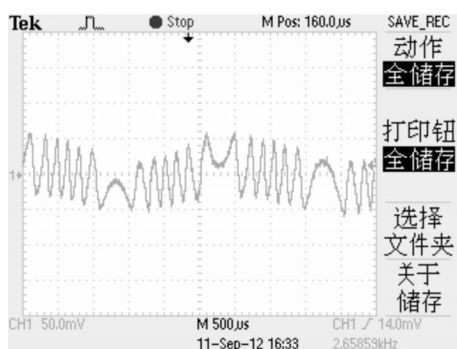


图4 自混合干涉实验示意图

实验时,LD与扬声器的距离约为12.5 cm,通过信号发生器(Tektronix AFG3022)给扬声器两端提供正弦电压。为了得到较好的自混合信号,调节封装在LD输出端面上的微透镜,使得出射激光的焦点正好落在扬声器的振动表面上时。不同于以往弱反馈下的振动测量,在扬声器的铝膜上贴一块镜子,通过微调扬声器的角度,以便获得较强的反馈强度。图5给出了在较强适度反馈下自混合干涉信号,图5a的实验结果与图3的仿真结果比较吻合。而随着反馈强度



(a)



(b)

图5 较强适度反馈下自混合干涉信号实验图

的继续增加,自混合干涉信号越来越不稳定,噪声增加,产生了较严重的失真(图5b)。

### 3 微振动测量

自混合干涉信号与传统的干涉类似,被测物体每移动整个波长的距离,就产生1个完整干涉条纹。为了避免反馈强度过强导致的波形偏移和失真,在扬声器表面贴了一层反射率稍弱的反光膜,选用310 Hz(扬声器共振频率)作为实验的驱动频率,依次改变驱动电压的峰峰值,获得不同的自混合干涉信号,如图6所示,然后通过条纹计数法来探测扬声器振幅的变化。两个自混合信号位移方向改变点

之间的锯齿波数即为自混合干涉条纹数。

由图6可知,电压为300 mV、600 mV、800 mV、1 000 mV时,所对应的波峰分别为1.7、3.8、5.2、6.5。

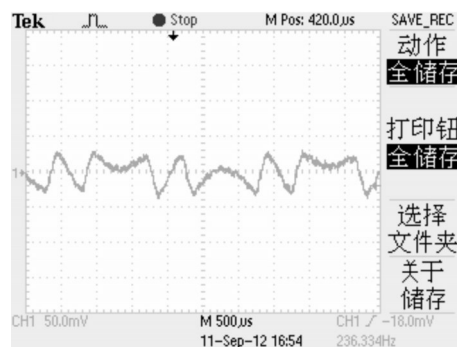
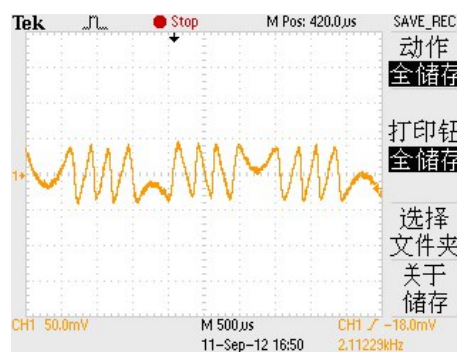
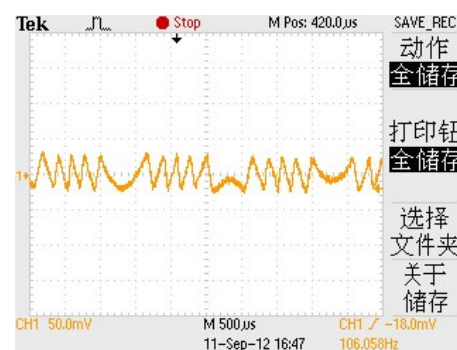
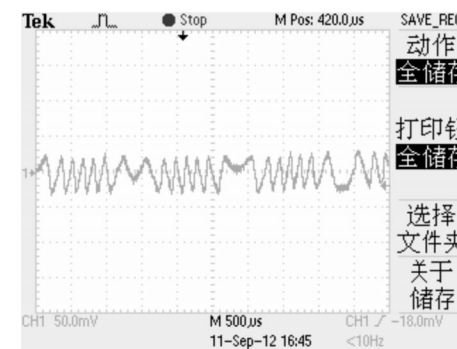
(a)  $V=300$  mV(b)  $V=600$  mV(c)  $V=800$  mV(d)  $V=1000$  mV

图6 不同电压下自混合干涉信号实验图

由此可知,在所加的1 000 mV电压范围内,电压每增加100 mV,增加约0.7个波峰数,对应的振幅变化为 $0.7 \times \frac{\lambda}{2} = 113.9 \text{ nm}$ ,如图7所示。

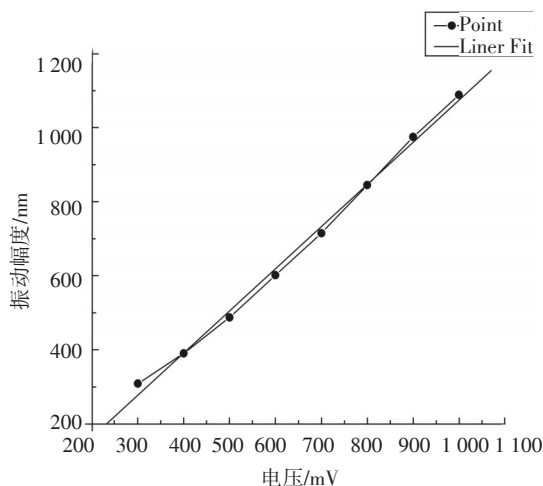


图7 扬声器振幅与驱动电压的关系

$$A = 1.139U - 0.03 \quad (2)$$

其中, $A$ 表示扬声器的振幅, $U$ 表示驱动电压峰值,图7实验结果的线性拟合度 $R=0.99786$ 。由此可见,在实验所加的电压范围内,扬声器的振幅与所加电压成良好的线性关系。

#### 4 结束语

运用三镜F-P腔理论分析和仿真了适度反馈下半导体激光器的自混合干涉效应,并进行了实验研究,获得了良好的实验数据,实验结果与理论仿真相符合。采用条纹计数法分析自混合干涉信号,实验结果显示,扬声器振动位移与驱动电压成良好的线性关系。这种基于半导体激光器的自混合干涉测量系统具有结构简单紧凑、易于集成、成本低、适用范围宽的优点,文中研究不同强度反馈下的自混合干

涉信号,对深入分析自混合效应的机理有一定的参考意义。

#### 参考文献

- [1] P.G.R.KING. Metrology with an optical master[J]. Rev.Sci., 1963,17:180-182.
- [2] N Servagent, F Gouaux, and T Bosch, Measurements of displacement using the self-mixing interference in a laser diode [J]. Journal of Optics-Nouvelle Revue D Optique, 1998, 29: 168-173.
- [3] F Gouaux, N Servagent, T Bosch, Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer[J]. Applied Optics,1998,37:6684-6689.
- [4] L Scalise N Paone. Self-mixing laser Doppler vibrometer[J]. Fourth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances And Applications. vol. 4072, E. P. Tomasini, Ed., ed Bellingham: Spie-Int Soc optical Engineering, 2000:25-36.
- [5] K Otsuka, K Abe, J Y Ko, et al. Real-time nanometer-vibration measurement with a self-mixing microchip solid-state laser[J]. Optics Letters, 2002,27:1339-1341.
- [6] G A Acket, D Lenstra, A J Denboef, et al. The influence of feedback intensity on longitudinal mode properties and optical noise in index-guided semiconductor-lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1984,20: 1163-1169.
- [7] Y Yu, G Giuliani, S Donati. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self-mixing effect[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004,16:990-992.
- [8] J T Xi, Y G Yu, J F Chicharo,et al. Bosch, Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry, IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005,41:1058-1064.
- [9] G Giuliani, M Norgia, S Donati, et al. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. Journal of Optics a-Pure and applied optics, 2002,4:S283-S294.

#### 本刊声明

凡向本刊投稿的作者,请按照本刊刊登论文的格式要求写稿,详情见本刊网站 [www.gdjsyy.com](http://www.gdjsyy.com)。我刊拒绝一稿多投,敬请作者自觉遵守!